

文章编号: 2095-4980(2016)04-0520-06

CoMP 上行链路基于属性的自适应分组算法

王 盛, 陈 松, 任修坤, 陈国军

(信息工程大学 导航与空天目标工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对传统协作多点传输技术(CoMP)系统的上行链路用户配对算法在实际系统中存在系统整体效率不高的问题, 提出了一种基于用户属性的自适应分组算法。该算法以可量化的用户属性为参数, 通过最小最大原则确定分组数量, 利用 k-means 方法进行用户聚类, 实现了对小区中用户的按属性自适应分组, 增加了同时传输的用户数量, 将基站侧多天线的数量优势转化为上行传输性能, 提高了系统上行和容量。仿真结果表明, 所提算法能够有效提高系统的上行和容量, 且在低信噪比(SNR)条件下仍可以获得预期的性能提升。

关键词: 协作多点传输; 用户分组; 虚拟多入多出; 和容量; 上行

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0520

Property based adaptive grouping algorithm in uplink CoMP

WANG Sheng, CHEN Song, REN Xiukun, CHEN Guojun

(School of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency problem of the traditional pairing method used in the uplink Cooperated Multi Point(CoMP) system, a user properties based adaptive user grouping algorithm is proposed. By taking the users' properties as parameters, the proposed algorithm could determine the number of groups with Min-Max distance measure method, then divide users into several groups with k-means method. Therefore, users are divided into several groups according to their properties. The simulation results show that the proposed algorithm can increase the uplink sum capacity of the system, and it is still effective even under low Signal to Noise Ratio(SNR). The advantages of multi-antenna at the base station side facilitate improving the uplink sum capacity of the system.

Key words: Cooperated Multi Point; user grouping; Virtual Multiple Input Multiple Output(VMIMO); sum capacity; uplink

随着蜂窝移动通信系统的迅速发展, 用户数量与日俱增导致基站布设越来越密, 相应的小区半径越来越小, 因而小区间的干扰(Inter-Cell Interference, ICI)问题日益凸显。协作多点传输技术(CoMP)可以有效解决小区间干扰问题, 一经提出立刻受到了学术界和产业界的广泛关注。其中, 上行协作多点传输技术(U-CoMP)主要是解决基站侧接收多个用户上行数据时的干扰问题。

由于在 U-CoMP 中基站会对多个用户设备(User Equipment, UE)进行协作处理, 具备多副分散的天线, 因此通常人们将上行协作看作是一种虚拟多入多出(VMIMO)系统。采用 VMIMO 方式构建的系统能够比单天线系统获得更大的自由度, 提高系统空间复用增益, 获得逼近采用 MIMO 系统时所获得的系统性能。为此, 需要将 2 个或 2 个以上的用户分组。用户分组实际上是将多个用户分配到相同的时频资源上的过程。目前, 国内外的研究大多针对 2 个用户的分组展开研究。文献[1]中给出了随机配对法、正交配对法、行列式配对法和基于 SNR 的配对法 4 种用户配对算法。但根据文献[2]的仿真显示, 上述算法适应性不强, 对系统性能提升有限。文献[3-7]提出了多种改进算法, 考虑了多用户的公平性等因素, 提升了系统性能。文献[8]证明了在不超天线数量的前提下, 分配在相同资源块上的用户数越多, 系统上行和容量越大, 且用户分组还可降低解码复杂度^[9]。因此, 可以考虑将多个用户分为一个分组, 通过提高分组内用户数量的方式来提高系统的上行和容量。

本文提出了一种适应性强的用户分组算法。该算法可灵活利用用户的多种属性作为依据, 通过计算加权的用

户间属性差异对用户进行自适应迭代分组,实现小区内多用户的合理分组。该算法将基站的多天线优势转化为系统的上行和容量,有效提高了系统的上行传输速率。另一方面,由于该算法将用户进行了分组,使得需要调度的对象明显少于配对算法,因而在降低用户调度复杂度方面也起到了一定的作用。

1 系统模型

本文在如图1所示的单基站的场景下展开研究。基站共有 j 副天线,与其周围的基站间不存在协作关系。小区内共有 K 个用户存在上行数据发送需求,每个用户只有一副天线。分组时,小区内的所有用户根据一定的准则被划分到若干个组中,每个用户仅属于一个组;基站的调度器在每个调度时隙 Δt 内从某个用户组中选择不多于天线数量的用户形成传输组,共享时频资源块进行上行传输。系统中的用户多址干扰可采用已有算法进行抑制或消除^[10]。其中,Tx表示发射天线,Rx表示接收天线,并假设系统中的所有条件均为理想条件。后文中,U表示所有用户,Uc表示划分的一个用户组。

上行VMIMO系统中,如果将时频资源块分配给多个用户,用户在调度器的调度下通过不同天线独立地发送其信号,可提高空复用的效率。为区分来自不同用户的数据流,可在基站侧使用半正定松弛(Semi-Definite Relaxation, SDR)译码器^[11]进行多用户检测。SDR译码器能够以较低的计算代价提供逼近于最大似然方法的检测性能。本文提出的用户自适应分组算法能够对小区内的用户按照其所具有的属性进行自适应分组,从而提高系统的上行和容量。

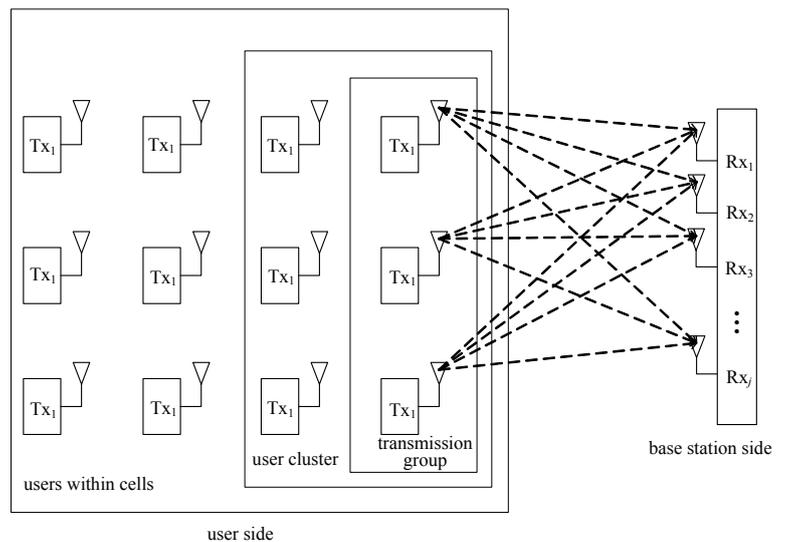


Fig.1 User grouping in CoMP system
图1 U-CoMP用户分组场景示意图

2 自适应用户分组算法

2.1 算法思想

自适应用户分组算法在每个调度时隙 Δt 内将多个用户按用户属性进行分组。用户属性可以是位置、速度、信噪比(SNR)等任何可量化的、在基站侧可获取的用户参数。为了进行用户分组,在考虑算法复杂度、运算速度等多方面因素的情况下,本算法采用k-means聚类算法。k-means算法是一种基于划分法的聚类算法,该算法可根据输入的聚类数量 k ,将数据集通过迭代划分的方式分为 k 个分组。该算法由于实现简单,运行快速,在数据挖掘领域得到了广泛应用。但是,为了保证算法的自适应性,本算法使用用户属性作为分组依据,而用户属性参数的分布乃至类型都是未知的,这就导致传统k-means算法所要求的输入参数 k 在本算法中是难以直接确定的^[12]。因此,首先要解决 k 值的确定问题。本算法采用最小最大距离法^[13]实现分组数量的自适应确定。最小最大距离法是一种基于试探的算法,通常应用于模式识别领域。最小最大法的另一个优势在于,该方法能够有效避免传统k-means算法中初始聚类中心过于靠近的问题。

综上所述,该算法的基本思想是:

1) 确定分组数量 k 。首先,随机选择2个距离较远的用户作为初始聚类中心;然后,从所有用户中迭代选择满足最小最大原则的用户作为新的聚类中心;最后,当迭代收敛,获得分组数量 k ,并获得本算法分组的第二代聚类中心。

2) 将用户划分为 k 组。首先,计算用户到聚类中心的差异值,将用户划分到与其差异值最小的聚类中心所属的分组中;完成一次分组后,计算分组的质心,并选取距离质心最近的用户作为分组算法的第二代聚类中心;重复上述过程,直到分组过程收敛。

2.2 算法设计

设每个用户具有 n 个属性,则对于每个用户,其属性可用向量 $\mathbf{p}=[p_1, p_2, \dots, p_n]$ 来描述。向量中的每个元素表示了一个用户属性。由此,小区中所有用户的属性可使用用户属性矩阵表示为:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{K1} & \cdots & p_{Kn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 p_{ij} 表示第 i 个用户的第 j 个属性的值。矩阵中的值即为对用户分组的依据。

根据用户属性矩阵 \mathbf{P} ，定义差异函数：

$$dis(u_i, u_j) = \sum_{l=1}^n \alpha_l (p_{il} - p_{jl})^2, \quad 0 < \alpha_l < 1, \quad \sum_{l=1}^n \alpha_l = 1 \quad (2)$$

式中 α_l 表示第 l 个参数在差异函数中的权重。差异函数表征了用户 i 和用户 j 的不相似程度，差异函数的值(差异值)越小，则 2 个用户在 n 个属性的考量上越相似，它们被划分到相同用户组中的概率越大。

算法依据最小最大原则进行分组数量的确定并产生聚类中心。记：

$$D = \max_{u_i \in \{U \setminus C\}} \min_{c_j \in C} dis(u_i, c_j) \quad (3)$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{|C|-1} \sum_{j=i+1}^{|C|} dis(c_i, c_j)}{\sum_{x=1}^{|C|-1} x}, \quad c_i, c_j \in C \quad (4)$$

式中： C 为所有聚类中心构成的集合； D 为 $\{U \setminus C\}$ 中元素到 C 中元素最小差异值的最大值； \bar{D} 为分组的聚类中心两两差异值的均值。若 $\exists \forall u_i \in \{U \setminus C\}$ ，满足

$$\begin{cases} \min_{c_j \in C} dis(u_i, c_j) = D \\ D > m \cdot \bar{D} \end{cases} \quad (5)$$

则取 u_i 为新的聚类中心，将其并入 C 中。其中， m 为最小最大法的差异值系数，分组的数量与 m 的取值成反比。

聚类中心产生完毕后，依据聚类中心进行 k-means 聚类，将用户分成 $|C|$ 个分组。分组原则如下：

$$C^{(i)} = \arg \min_j dis(u_i, c_j) \quad u_i \in \{U \setminus C\}, c_j \in C \quad (6)$$

式中 $C^{(i)}$ 表示用户 u_i 的所属分组的编号。利用式(6)，可将 $\{U \setminus C\}$ 中各元素分类到与聚类中心的差异值最小的分组中去。这些元素及其聚类中心形成各用户分组 U_{ci} ($0 < i \leq |C|$)。

定义函数 $f(u_i, j) = \begin{cases} 1, C^{(i)} = j \\ 0, C^{(i)} \neq j \end{cases}$ ，表示用户 u_i 是否属于分组 j ，则对于分组 j ，其质心 μ_j 为：

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^K f(u_i, j) u_i}{\sum_{i=1}^K f(u_i, j)} \quad (7)$$

当一次聚类完成后，分别计算各分组的质心，然后根据计算结果重新选择距离质心最近的元素作为新的聚类中心，并进行新一次的聚类迭代，直到算法收敛。

算法的实现步骤如下：

Step1: 从所有用户集合 U 中随机选取一个用户 Z_1 ，作为首个聚类中心，将其加入 C 中；

Step2: 从 $\{U \setminus C\}$ 中选取与 Z_1 差异值最大的用户 Z_2 ，作为第 2 个聚类中心加入 C 中；

Step3: 计算 \bar{D} ；

Step4: 对 $\{U \setminus C\}$ 中的所有用户，计算 D 。若存在某用户满足式(5)，则将该用户加入到 C 中，否则转到 Step6；

Step5: 转到 Step3；

Step6: 取 $k = |C|$ ；

Step7: 对 $\{U \setminus C\}$ 中的所有用户，按式(6)计算其所属分组；

Step8: 对所有分组，按式(8)计算其质心；

Step9: 对所有分组，查找与质心差异最小的用户，并将该用户选取为新的聚类中心，形成新的 C ；

Step10: 转到 Step7，直到算法收敛。

综合算法思想和算法设计可以看出, 分组过程中所采用的用户属性是影响分组结果的重要因素。而当用户属性确定后, 式(5)中的 m 值的选取将会对分组结果产生较大影响; 而不同的分组结果将会影响系统上行和容量。因此, 在下节中将以系统上行和容量为评价指标, 对所提算法进行性能评估。

3 仿真及分析

本节中将对所提算法在不同接收天线数、不同 m 值及不同 SNR 条件下进行性能评估, 并将其与文献[2]中基于 SNR 的用户配对算法进行比较。为讨论方便, 在进行系统资源分配时, 分组间和分组内的调度均采用轮询法进行。

3.1 仿真参数设置

仿真参数依据 3GPP 关于 E-UTRAN 物理层的相关标准进行设置^[14]。具体设置如表 1 所示。

由于本文所述的上行协作多点传输可看作是一个 $j \times j$ 的 VMIMO 模型, 即基站具有 j 副天线, 从所有用户中选出至多 $|U_t| \leq j$ 个单天线用户组成分布式的发射阵列, 故其系统上行和容量可表示如下:

$$C = \frac{B}{N} \sum_{n \in N} \sum_{u \in U_t} \log_2 \left[1 + \frac{E_s l_u H_u(n)}{|U_t| N_0} \right] \quad (8)$$

式中: U_t 为选出的传输用户组成的集合; u 为用户天线编号; l_u 为天线 u 的路径损耗; E_s 为常量, 是单个符号时间内的平均信号发送能量, 这里假设所有用户的该值均相等; N_0 为加性高斯噪声(AWGN)的单边频谱密度; $H_u(n)$ 是天线 u 在第 n 个子载波上的信道增益; N 为总子载波数; B 为系统带宽。

3.2 仿真结果及分析

图 2 所示为用户分组结果。仿真结果表明, 分组的数量随着 m 的增加而减少, 但至少为 2 个。这是由于 m 的值影响了式(5)中 D 的计算, 使得在使用最小-最大准则进行分组数量计算时分组内用户数量发生变化, 从而影响了分组数量。而分组的数量至少为 2, 这是由于在分组的初始阶段选取了 2 个用户作为初始聚类中心造成的。

图 3 给出了系统在不同 m 值、不同 SNR 及不同接收天线数条件下本文算法与对比算法的性能比较结果。在各图中, 上方的曲面为本文算法的仿真结果, 下方的曲面为对比算法的仿真结果。

根据仿真结果可以看到, 在本文算法仿真结果中, 不同的 m 值在 SNR 较低时对系统和容量影响较小, 但随着 SNR 的升高, 其对系统和容量的影响逐渐明显。这表明, 由于 m 的不同而导致的不同分组结果将影响系统的上行和容量。 m 值越小, 则分组越多, 组内用户越少, 当用户数少于基站侧的接收天线数时, 资源不能得到充分利用, 因而上行和容量较低; m 值越大, 则分组越少, 组内用户越多, 分配给每个用户的可用资源越少, 因而和容量也无法得到提高。而在给定 m 值的条件下, 本文所给算法通过对用户进行分组, 可以提高系统的和容量, 且对低 SNR 条件下的系统和容量也有一定的提升, 而在较高 SNR 条件下性能提升更加明显。

在不同天线数条件下, 配对算法在天线数量增加的情况下系统和容量几乎没有得到提升, 而所给算法随着天线数量的增加, 系统和容量得到了一定的提升。这表明, 所给算法可以将系统中天线数量的优势转化为系统和容量。然而从图中也可看到, 系统性能的提升并没有与接收天线数量的增加成线性比例。这是由于系统和容量与用户传输组中的用户数量 $|U_t| \leq j$ 有关(见式(8))。

4 结论

本文提出了一种上行协作多点传输中的自适应用户分组算法, 扩展了传统的两用户配对方法。该算法通过对用户

表 1 参数设置
Table1 Simulation settings

parameters	simulation 1
count of user antennas	1
count of base station antennas	2,4,8,16
count of users	120
radius of cells	500 m
count of subcarriers	1 024
velocity	0-60 km/h ($\alpha = 0.2$)
direction	any ($\alpha = 0.4$)
position	any within coverage ($\alpha = 0.1$)
range of SNR	-10 dB-20 dB ($\alpha = 0.3$)
system	TDD
CSI	ideal

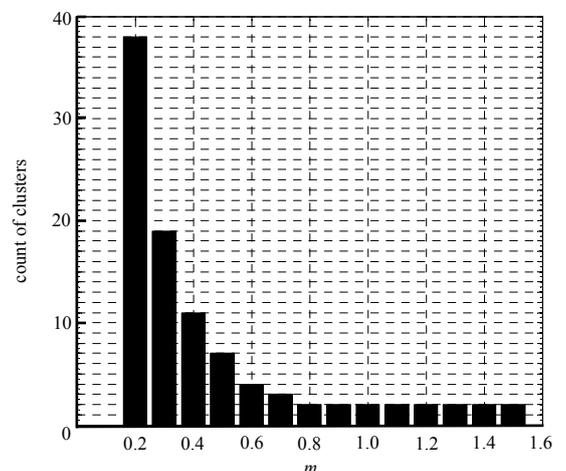


Fig.2 Simulation results of user clustering
图 2 用户分组仿真结果

进行自适应分组、增加同时传输的用户数量的方式,提高系统的上行和容量。仿真结果表明,所给算法提高了系统上行和容量,在低 SNR 条件下仍能获得一定的性能提升,且能够将基站侧多天线的数量优势转化为上行性能。

虽然所提算法只讨论了多个单天线用户的情况,但实际上对于多个多天线用户也是适用的。这可通过假设数据流是通过特定用户的每个天线的发送来实现。在这种情况下,用户终端上的每个天线都可以看作是一个单天线用户,从而可使用相同的算法进行分组和上行调度。

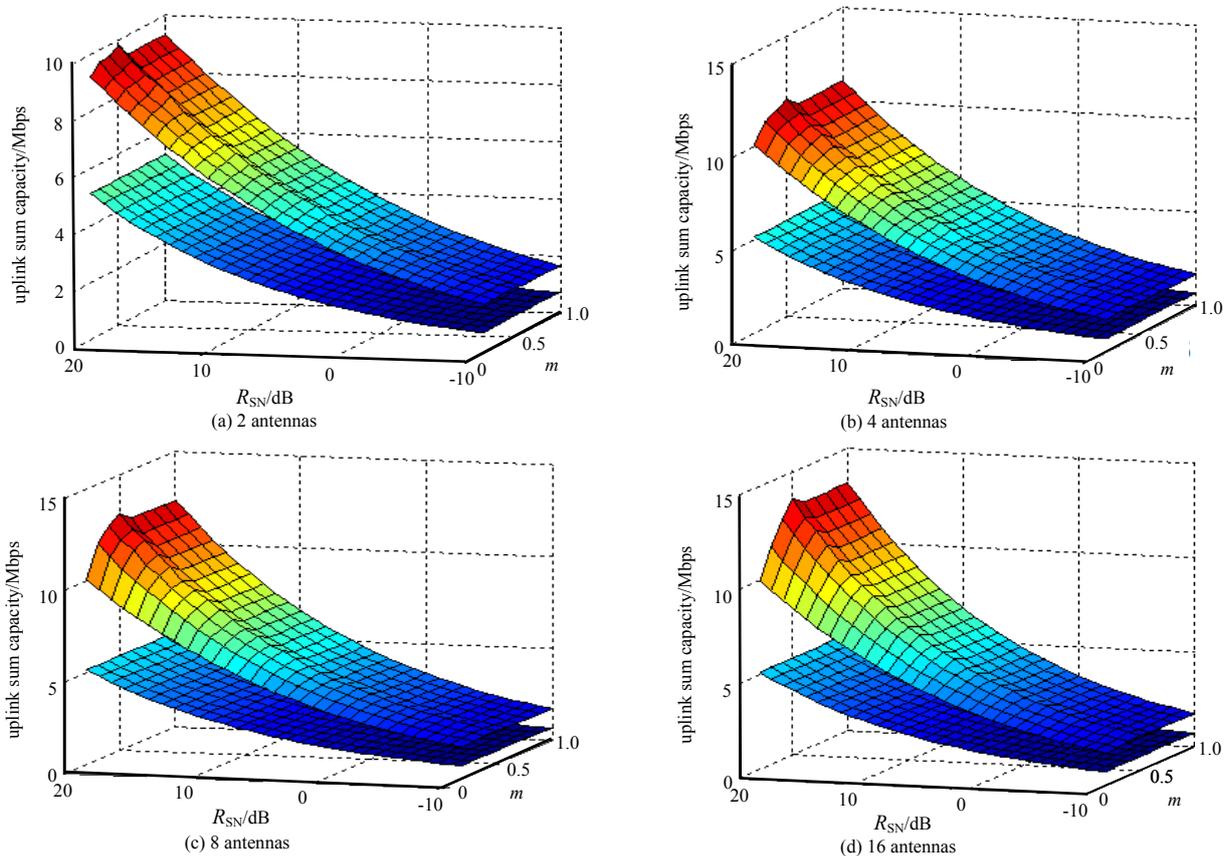


Fig.3 Comparison with different values of m , R_{SN} and number of antennas
图 3 不同 m 值、不同信噪比及不同接收天线数条件下本文算法与对比算法的性能比较

参考文献:

- [1] NORTEL. UL virtual MIMO system level performance evaluation for E-UTRA[C]// 3GPP TSG-RAN1 WG1#43 R1-051422. Seoul,Korea:[s.n.], 2005,1-6.
- [2] 聂永萍. CoMP-MU-MIMO 上行用户配对方案性能比较[J]. 数字通信, 2009,36(6):41-44. (NIE Yongping. Performance comparison of multi-user partnership schemes for CoMP-MU-MIMO[J]. Digital Communication, 2009,36(6):41-44.)
- [3] CHEN X,HU H,WANG H,et al. Double proportional fair user pairing algorithm for uplink virtual MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008,7(7):2425-2429.
- [4] RUDER M A,DING D,DANG U L,et al. Combined user pairing and spectrum allocation for multiuser SC-FDMA Transmission[C]// IEEE International Conference on Communications. Kyoto,Japan:[s.n.], 2011:1-6.
- [5] RUI Y,HU H,YI H,et al. Robust user pairing algorithm under channel estimation errors for uplink virtual multiple-input multiple-output systems[J]. IET Communications, 2012,6(3):318-323.
- [6] LI Y,WANG W,ZHANG X,et al. Combined proportional fair and maximum rate scheduling for virtual MIMO[C]// IEEE Vehicular Technology Conference. Calgary,Canada:[s.n.], 2008:1-4.
- [7] WANG X,WANG W,ZHAO Z,et al. Fairness adjustable grouping multiuser scheduling for MIMO MAC with MMSE-SIC receiver[C]// 2008 IEEE GLOBECOM Workshops. New Orleans,LA,USA:[s.n.], 2008:1-5.
- [8] LIN C J,GOLLAkota S,KATABI D. Random access heterogeneous MIMO networks[J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2015,41(4):146-157.
- [9] DANG J,ZHANG W,YANG L,et al. OFDM-IDMA with user grouping[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013,61(5): 1947-1955.

(下转第 548 页)